



بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت فولاد زنگ‌نزن 316L تقویت شده با نانو ذرات TiC/hBN با نسبت وزنی 2 و 10 درصد

علی صدوقی¹، غلامحسن پایگانه^{2*}، مهدی تاجداری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک

* تهران، صندوق پستی 1678815811، g.payganeh@srutu.edu

چکیده

روش متالورژی پودر یکی از روش‌های ساخت نانو کامپوزیت می‌باشد که در آن خواص نانو کامپوزیت‌ها بستگی به درصد تقویت کننده و پراکندگی آن‌ها در ماتریس دارد. در این مقاله نانو کامپوزیت زمینه فلزی به روش متالورژی پودر با ماده پایه فولاد زنگ‌نزن 316L، که ماده‌ای پرکاربرد در صنعت می‌باشد، و ذرات تقویت کننده مخلوطی از کریبید تیتانیوم به عنوان تقویت کننده پایه کربنی و هگزاگونال نیتريد بور به عنوان ماده خود روان کار، تهیه شده است. پودرهای تقویت کننده در سائز میکرو انتخاب گردیدند و در آسیاب سیاره‌ای پودرهای مخلوط شدند تا به سائز نانو تبدیل برسند. پودرهای تقویت کننده پس از 30 ساعت آسیاب به سائز نانو رسیدند. سپس پودر فولاد زنگ‌نزن 316L و تقویت کننده‌ها با نسبت 2 و 10 درصد وزنی به مدت 5 ساعت آسیاب شدند و تحت فشار 400 مگاپاسکال فشرده و در دمای 1400 درجه سلسیوس و به مدت 3 ساعت در کوره‌ی خلا پخته شدند. نمونه‌ها تحت بررسی عکس برداری الکترونی و آنالیز طیف سنجی الکترونی و آنالیز اشعه ایکس برای شناسایی میکروساختاری ماده قرار گرفتند و در ادامه خواص مکانیکی ماده از جمله سختی و سایش و خمش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج با نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن 316L بدون تقویت کننده مقایسه گردید. سختی و مقاومت سایشی ماده نانو کامپوزیت بهبود یافته است و استحکام خمشی در نمونه‌ی با 2 درصد وزنی تقویت کننده بهبود و در نمونه‌ی با 10 درصد وزنی تقویت کننده کاهش یافت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 4 بهمن 1396

پذیرش: 28 اسفند 1396

ارائه در سایت: 24 فروردین 1397

کلید واژگان:

نانو کامپوزیت

متالورژی پودر

خواص مکانیکی

Mechanical Behavior analysis of Stainless Steel 316L Nanocomposite Reinforcement by Nanoparticles TiC/hBN with 2 & 10 wt. %

Ali Sadooghi¹, Gholam Hassan Payganeh^{1*}, Mehdi Tajdati²

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Arak Branch Islamic Azad University, Arak, Iran

* P.O.B. 1678815811, Tehran, Iran, g.payganeh@srutu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 January 2018
Accepted 19 March 2018
Available Online 13 April 2018

Keywords:

Nanocomposite
Metallurgy Powder
Mechanical behavior

ABSTRACT

Powder metallurgy process is commonly used to manufacture nanocomposite products, in which the product quality of this process depends upon Composite of reinforcement nanoparticle and distribution. In this article Metal Matrix Nanocomposite (MMN) by powder metallurgy with a base material stainless steel 316L, a material that is widely used in the industry, and reinforcement particles mixture of Carbide Titanium (TiC) as carbon-based reinforcing particles, and Hexagonal Nitride Boron (hBN) particles as the self-lubricating material is prepared. The reinforcement powders were micro Sized and mixed in high ball milling to reach Nano-sized, after 30 h mixing powders in high ball milling reach to Nano-sized, and then reinforcement Nanoparticles with 2 and 10 Wt.% Mixed with stainless steel 316L for 5 hours and compacted at 400 Mpa and sintered at 1400 C temperature and 3 Hours. Scanning electron microscope (SEM), Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) and X-ray Diffraction (XRD) tests are performed on Powders to identify the nanocomposite microstructure. The Mechanical Properties such as Microhardness, Wear, and Bending Strength Were Analyzed. These results Compare with Results of stainless steel 316L without Reinforcement. Microhardness and abrasion resistance of Nanocomposite material have improved and flexural strength improved at the sample with 2 wt.% reinforcement and reduced at the sample with 10 Wt.%.

1- مقدمه

نانومتر باشد [1]. برای رسیدن به خواص بهتر در نانو کامپوزیت‌ها می‌بایست توزیع اندازه نانو ذرات و پراکندگی آن‌ها در فاز مانریس کامپوزیت را یکنواخت نمود [2]. نانو کامپوزیت‌ها در دو فاز که شامل فاز زمینه یا ماتریس، در ابعاد

نانو کامپوزیت‌ها مواد مرکب و چندفازی هستند که حداقل یکی از عناصر الیازی تشکیل دهنده‌ی آن‌ها دارای ابعادی در مقیاس نانومتری 1 تا 100

میکرو و فاز تقویت‌کننده با ساختاری بلوری و ابعاد نانو تشکیل می‌شود. فاز زمینه ممکن است از جنس پلیمر، فلز یا سرامیک باشد. در فاز دوم ذراتی در مقیاس نانو به عنوان تقویت‌کننده برای استحکام، مقاومت، هدایت الکتریکی و ... به فاز اول افزوده می‌شود [3]. در نانوکامپوزیت‌ها از نانو ذرات به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود. این ذرات علاوه بر استحکام، وزن آن‌ها را نیز کاهش می‌دهند. مهمترین کامپوزیت‌های نانو ذره‌ای سبک‌ترین آن‌ها هستند [4]. نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی یکی از مهمترین دسته‌های نانوکامپوزیت‌ها می‌باشند که به خاطر برخی خواص ویژه آن همواره مورد توجه قرار گرفته است [5]. اخیراً نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به طور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته است، با توجه به این‌که روش‌ها و فرآیندهای تولید این نوع نانوکامپوزیت مقداری چالش برانگیز است. یکی از بزرگترین مزیت‌های نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی، کارایی مکانیکی عالی، قابلیت استفاده در دماهای بالا، مقاومت سایشی خوب و نرخ خزش پایین آن‌هاست [6]. نانو ذراتی که به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود شامل اکسیدها مانند اکسید آلومینوم، کاربیدها مانند کربید سیلیسیوم، نیتريد‌ها مانند نیتريد آلومینوم و ... می‌باشد [7]. هرچه اندازه نانو ذره کوچکتر باشد، اثر در هم‌کنش ذرات بهتر و منجر به پیوند بهتر بین ماتریس و نانو ذره می‌شود که در نهایت سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود [8]. متالورژی پودر شیوه‌ای برای شکل‌دهی فلزات است و روشی است برای ساخت و تولید قطعات فلزی و سرامیکی است که اساس آن بر فشردن پودر مواد به شکل موردنظر است [9]. روش متالورژی پودر، روشی معمول برای آماده‌سازی اجزای بزرگ با ساختاری ریز و چگال می‌باشد، به این صورت که ترکیب نهایی از لحاظ خواص به مانند پودرهای اولیه می‌باشد [10]. موادی که به روش متالورژی پودر ساخته می‌شوند با بهره گرفتن از مواد جامد روانکار، می‌توانند خواص خود روانکاری نیز به دست بیاورند [12]. در تکنیک متالورژی پودر که در حالت جامد ماده اتفاق می‌افتد، واکنش‌های مصنوعی بین ذرات به حداقل می‌رسد و ماده‌ای همگن و ایزوتروپیک با پراکندگی مناسب حاصل می‌شود. فولاد زنگ‌نزن سری 300، فولاد آستینیتی و غیرمغناطیس می‌باشد و دارای مقاومت خوب خوردگی، داکتیلیتی مناسب و پرمصرف در صنعت می‌باشد [12]. برخی از خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن، در دماهای بالا کم می‌باشد که افزودن نانو ذرات به بهبود این خواص فولاد زنگ‌نزن کمک می‌کند [13]. یکی از بهترین مواد تقویت‌کننده برای فولاد زنگ‌نزن کربیدتیتانیوم می‌باشد که نتایج خوبی را به همراه آورده است که با توجه به سختی و مقاومت بالا و چگالی کم این ماده و با توجه به این‌که نقطه ذوب و مدول الاستیسیته بالایی دارد، هنگامی که با فلزات مخلوط شود، خواص مکانیکی و مقاومت سایشی خوب ایجاد می‌کند [14]. روش انتخابی برای ساخت ماده‌ی نانوکامپوزیت، روش آلیاژساز مکانیکی به همراه تف‌جوشی می‌باشد. مقاومت سایشی و سختی به چندین پارامتر مانند حجم تقویت‌کننده، سایز، پراکندگی و نحوه پیوند آن‌ها بستگی دارد و اگر پیوند بدون عیب باشد، خواص مکانیکی بهبود پیدا می‌کند [15]. برخی از مواد مانند، نقره، قلع، سرب، سولفات مولیبدن، هگزاگونال نیتريد بور، و گرافیت خودروانکار هستند [16]. هدف استفاده از خودروانکارها، رسیدن به استحکام بالا، ضریب اصطکاک کم و مقاومت سایشی بالا می‌باشد [17]. مواد خودروانکار مانند هگزاگونال نیتريدبور دارای ساختار لایه‌ای و پیوند کوالانسی محکم بین اتم‌ها در هر لایه و پیوند واندروالس ضعیف بین هرا لایه می‌باشد که این ساختار کمک می‌کند تحت بارگذاری راحت برش بخورد و سبب کاهش ضریب اصطکاک شود [18]. نیتريد بور در حالت بدون روان کار مانند خودروانکار عمل می‌کند و سبب کاهش ضریب اصطکاک و نرخ سایش

خواهد شد. نیتريدبور گاهی به سرامیک‌ها برای خواص خودروانکاری و نیز گاهی با اکسیدها، بوریدها و کربیدها برای افزایش مقاومت حرارتی و خوردگی افزوده می‌شود [19]. در برخی مواد مشاهداتی در بهبود ماشین‌کاری و چقرمگی، وقتی هگزاگونال نیتريد بور افزوده می‌شود، مشاهده شده است [20]. اونوها و همکارانش [21] به بررسی اثر سایز کربیدتیتانیوم بر روی خواص فولاد زنگ‌نزن 316L پرداختند. دو نوع سایز میکرو و نانو مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد هرچه سایز تقویت‌کننده ریزتر باشد چگالی بیشتری، سختی بالاتر و بهبود چقرمگی و رفتار سایشی به دست آمده است. هرچه سایز ماده‌ی تقویت‌کننده ریزتر باشد، مقاومت آن در مقابل تغییر شکل پلاستیک بیشتر است و به صورت همگن‌تری در ماده پایه مخلوط و ماده ایزوتروپیک حاصل می‌شود. اوه و همکارانش [22] به بررسی آزمون کشش فولاد زنگ‌نزن در حالت تقویت‌کننده و بدون تقویت‌کننده پرداختند. با افزودن شدن کربید تیتانیوم به ماده، استحکام کششی بالا می‌رود و خواص استحکامی بهتری حاصل شده است. مدول الاستیسیته کربیدتیتانیوم بالاست و ترکیب آن با فولاد زنگ‌نزن، خواص مکانیکی بهتری را به وجود آورده است. نتیجه‌ی آزمون کشش با تقویت‌کننده سبب افزایش استحکام لهیدگی شده است و تمودار تنش- کرنش به صورت کارسخت شده به دست آمد و چقرمه‌گی ماده بیشتر شده است. هو و همکارانش [23] در کاری مشابه کربیدتیتانیوم را به فولاد زنگ‌نزن منیزیم‌دار اضافه کردند و به نتایج مشابهی در مورد نتایج آزمون سختی و سایش دست یافتند. ماده‌ی تقویت شده در مقابل با تغییر جریان پلاستیک مقاومت می‌کند که این مقاومت توسط ذرات تقویت‌کننده اتفاق می‌افتد. چن وونی و همکارانش [24] فولاد زنگ‌نزن 316L را با 10% پودر میکرو کربیدتیتانیوم با کمک آسیاب سیاره‌ای مخلوط کردند تا به ماده نانوکامپوزیت برسند. از نمونه‌ها عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی در زمان‌های مختلف آسیاب انجام شد. نتایج نشان داد زیر 20 ساعت آسیاب، نانوکامپوزیت حاصله به دو دلیل مناسب نمی‌باشد. دلیل اول پراکندگی خوبی بین ذرات پودر فولاد زنگ‌نزن و کربید تیتانیوم حاصل نشده است و دلیل دوم این‌که ذرات کربید تیتانیوم به سایز نانو نرسیدند. با افزایش زمان آسیاب و مقایسه‌ی نتایج عکس‌برداری به این نتیجه می‌رسند که از 20 تا 60 ساعت آسیاب پودرها، نانوکامپوزیت حاصله از نظر پراکندگی و سایز ذرات تقویت‌کننده مناسب می‌باشد. با ادامه‌ی زمان آسیاب بیشتر از 60 ساعت مشاهده می‌شود به دلیل تعدد شکستن و ایجاد جوش سرد بین ذرات، مخلوط کلوخه می‌شود و نتایج خوبی در خواص مکانیکی حاصل نشده است. شیرانی و همکارانش [25] در تحقیق خود به تولید کامپوزیت Fe-50Ni-TiC به روش آلیاژساز مکانیکی پرداختند. ابتدا پودر آهن و نیکل به همراه درصدهای متفاوتی از کربیدتیتانیوم را در آسیاب سیاره‌ای مخلوط کردند. پودرهای حاصله فشرده شدند و در کوره تحت گاز هیدروژن حرارت دیدند. نمونه‌های پخته شده را تحت آزمایش میکروسختی قرار دادند و بیشترین سختی مربوط نمونه‌ای با 30 درصد تقویت‌کننده کربید تیتانیوم که عدد 540 ویکرز حاصل شده است به دست آمد. با افزایش درصد کربید تیتانیوم در کامپوزیت آهن و نیکل دو نتیجه حاصل شده است. اول این‌که با افزایش درصد کربید تیتانیوم دانسیته کاهش و سختی ماده افزایش می‌یابد. گنگ و همکارانش [26] برای ساخت نانوکامپوزیت از تقویت‌کننده کربید تیتانیوم برای بهبود رفتار مکانیکی ماتریس تنگستن استفاده کردند. برای انجام این کار از 2% تقویت‌کننده در آسیاب سیاره‌ای و از 10% نیکل به عنوان ماده کنترل‌کننده عملیات استفاده کردند. پودرها را در زمان‌های مختلف آسیاب کردند و در نهایت پس از فشرده‌سازی خشته‌ها را مورد حرارت قرار دادند و در نهایت

می‌شود.

در این مقاله، تهیه نانوکامپوزیت پایه فولاد زنگ‌نزن 316L با ماده تقویت کننده نانوذره $1\% \text{TiC} - 1\% \text{hBN}$ و $5\% \text{TiC} - 5\% \text{hBN}$ انجام پذیرفته است. فولاد زنگ‌نزن 316L به علت ماده‌ی پرکاربرد در صنعت به عنوان ماده پایه انتخاب گردیده است. برحسب پژوهش‌های پیشین مشاهده شده است، کربیدتیتانیوم به‌علت این‌که پیوند خوبی با فولاد زنگ‌نزن ایجاد می‌کند و سبب بهبود خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن می‌گردد، انتخاب شده است. ماده‌ی تقویت‌کننده‌ی دیگر یعنی هگزانگونال نیتريدبور به عنوان ماده‌ی خودروانکار که سبب کاهش ضریب اصطکاک و افزایش مقاومت سایشی می‌شود انتخاب شده است. این ماده به واسطه‌ی ساختار لایه‌ای که دارد در برخی موارد سبب کاهش خواص مکانیکی در ماده نیز می‌شود. در این مقاله بررسی اثر این دو تقویت‌کننده با نسبت مساوی مورد ارزیابی قرار گرفته است. اگر نسبت نیتريدبور بیشتر باشد، خواص مکانیکی به واسطه‌ی ساختار این ماده کاهش می‌یابد. براساس پژوهش‌های پیشین 2 درصد وزنی تقویت‌کننده برای حداقل اثر بخشی ذرات تقویت‌کننده در ماده نیاز است و 10 درصد وزنی تقویت‌کننده به منظور حداکثر اثربخشی ذرات تقویت‌کننده و عدم کلوخه شدن ذرات تقویت‌کننده در ماده انتخاب شده است. ساخت نمونه‌ها با روش متالورژی پودر انجام شده است و برای این منظور پودرها در آسیاب سیاره‌ای تحت گاز آرگون مخلوط شدند و فشردن پودرها در فشار 400 مگاپاسکال با کمک دستگاه ایزواستاتیک سرد و پخت در کوره‌ی خلا دما بالا در دمای 1400 درجه سلسیوس و به مدت 3 ساعت انجام پذیرفت. پارامترهای فوق براساس پژوهش‌های پیشین و استانداردهای متالورژی پودر انتخاب گردیده است. همچنین در این مقاله همچنین بررسی میکروساختاری ماده‌ی نانوکامپوزیت تهیه شده با عکس‌برداری از پودرها و نمونه‌ها توسط آزمون‌های SEM, XRD, EDX انجام پذیرفت. همچنین بررسی خواص مکانیکی ماده از قبیل میکروسختی، سایش و استحکام خمشی صورت پذیرفت و نتایج حاصله با نتایج فولاد زنگ‌نزن بدون تقویت کننده مقایسه گردید.

2- روش تجربی

روش ساخت قطعات و نمونه‌ها با روش متالورژی پودر انجام پذیرفت. مراحل انجام متالورژی پودر به ترتیب، شامل تهیه پودر، فشرده‌سازی، و پخت در کوره در زمان و دمای مناسب هر ماده می‌باشد. ماده پایه انتخاب شده فولاد زنگ‌نزن 316L است و ماده تقویت کننده نیز به صورت ترکیبی و مقدار مساوی دو ماده TiC و hBN می‌باشد. پودرکربیدتیتانیوم ساخت کشور بلژیک با خلوص 99% و در سائز میکرو از شرکت پوریان و پودر نیتريدبور ساخت کشور انگلستان با خلوص 99% و در سائز میکرو از شرکت پیشرو سرامیک مهر تهیه شده است. پودر فولاد زنگ‌نزن ساخت آلمان از شرکت کیمیای پارسیان با خلوص 95% و سائز 100 میکرونی تهیه شده است. آسیاب سیاره‌ای استفاده شده در این مقاله به منظور تهیه‌ی پودر همگن، مدل اس‌وی‌آی‌سی 5 دارای 4 کاپ و با گلوله‌های فولادی با نسبت 10 به 1 و تحت گاز آرگون با سرعت 250 rpm، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین عناصر به همراه استنارات روی به میزان 5% درصد وزنی به عنوان عنصر کنترل‌کننده فرایند استفاده شده است. این عنصر به‌منظور روان‌کاری برای عدم کلوخه شدن ذرات و عدم پیوند بین فلزی در ماتریکس در آسیاب مورد استفاده قرار گرفته است [35]. برای عکسبرداری الکترونی روبشی از دستگاه ساخت مدل فنوم تی‌ام استفاده شده است. برای بررسی خصوصیات کریستال‌ها از پراش اشعه ایکس استفاده شده است. دستگاه مورد استفاده

چگالی و سختی خسته‌ها را برحسب زمان آسیاب محاسبه کردند و هرچه زمان آسیاب بیشتر شد، به‌علت پراکندگی و پیوند مناسب ذرات تقویت‌کننده سختی ماده افزایش یافت. لی و همکارانش [27] برای تهیه ماده نانوکامپوزیتی جدیدی، تیتانیوم را با کربیدبور به نسبت 1 به 3 مخلوط کردند و در آسیاب به مدت 8 ساعت مخلوط کردند و در آسیاب واکنشی صورت پذیرفت که در آن ماتریس TiB_2 و ماده تقویت کننده TiC حاصل شد و عکس‌برداری‌ها حاکی از آن است که پراکندگی خوبی حاصل شده است و در آن ابعاد نانوذرات به 8 نانومتر رسیده است. چن و همکارانش [28] به بررسی خواص مکانیکی نیتريد سیلیسیوم، Si_3N_4 ، به عنوان ماده پایه و تقویت‌کننده hBN به نسبت‌های متفاوت وزنی پرداختند. نمونه‌ها تحت فشار گرم آماده شده‌اند. آزمایشات نشان می‌دهد، با افزایش ماده تقویت‌کننده، مقاومت خمشی، سختی، چقرمگی کم شده است ولی ضریب اصطکاک از 0.95 در حالت بدون تقویت‌کننده به 0.03 در حالت 30 درصد تقویت‌کننده رسیده است. لیان ژاو و همکارانش [29] با ترکیب پودر Si_3N_4 به‌عنوان ماتریس و پودر نیتريد بور به‌عنوان ماده تقویت کننده به ساخت ماده نانوکامپوزیت جدیدی اقدام کردند. آن‌ها پودرها را در آسیاب سیاره‌ای مخلوط و فشرده کردند. خسته‌ها را در کوره حرارت دادند، و نمونه‌ها را تحت آزمون خمشی سه نقطه و میکروسختی قرار دادند. سختی با افزایش نیتريد بور کاهش یافت و حداکثر استحکام خمشی در 5 درصد نیتريد بور حاصل شد. وی و همکارانش [30] نیز به ماده نیتريد سیلیسیوم، ماده‌ی hBN در سائز میکرو افزودند، ذرات اضافه شده سبب کاهش بسیار کمی در استحکام خمشی و چقرمگی، مدول و سختی شدند و علت این پدیده، پیوند ضعیف و استحکام کم بین ذرات ماده پایه و تقویت‌کننده ارزیابی شد و در آزمون سایش مشخص شد، ضریب اصطکاک و نرخ سایش کاهش یافت. علت این پدیده، ایجاد شدن لایه روانکار در سطح سایش بوده‌است. در تحقیق مشابه پتراک و همکارش [31] همین ماده پایه و تقویت‌کننده را مورد بررسی قرار دادند ولی آن‌ها سائز مواد تقویت‌کننده را نانو انتخاب کردند و به نتیجه‌ی بهتری در چقرمگی ماده دست یافتند و موید این مطلب می‌باشد که هرچه ماده ریزتر باشد، پیوند و استحکام بین مواد و ذرات تقویت‌کننده قوی‌تر می‌باشد و خواص مکانیکی بهبود یافته است. ساخان و همکارش [32] برای تولید ماده نانوکامپوزیت جدیدی به ترکیب مخلوط پودرهای Fe-Cr-Al به عنوان ماده زمینه و پودر تقویت کننده TiB_2 پرداختند. ماده‌ی ماتریس، برای کارهای با درجه حرارت بالا مناسب و دارای مقاومت خوردگی بالا می‌باشد. همه پودرها با سائز میکرو و نسبت وزنی ماده زمینه به صورت 20%Cr با 5%Al می‌باشند. ماده‌ی ماتریس را با 30% تقویت کننده با ابعاد میکرو را درون آسیاب سیاره‌ای قرار داد و بعد از 48 ساعت مخلوط کردن ذرات، به سائز حدود 36 تا 50 نانومتر رسیدند و همچنین پراکندگی خوبی بین مواد به‌دست آمد. شون و همکارانش [33] به تهیه نانوکامپوزیت با زمینه Fe-Cr-Al-Si و تقویت کننده Al_2O_3 پرداختند. برای این کار از روش آلیاژ ساز مکانیکی کردند. پودرها را در آسیاب سیاره‌ای به مدت 10 ساعت و تحت گاز آرگون مخلوط کردند. اندازه ذرات بین 7 تا 55 نانومتر رسیدند. مخلوط حاصله را فشرده کردند. خسته فشرده شده را در کوره حرارت دادند و بعد از پخت آزمون میکروسختی ویکرز از نمونه‌ها انجام پذیرفت که عدد 650 به‌دست آمد. همین نتیجه‌ی مشابه یعنی افزایش سختی ماده را مانوانان و همکارش [34] برای آلومینوم به‌عنوان فلز پایه و تقویت‌کننده‌ی کربیدسیلیسیوم به‌دست آوردند. افزایش سختی ماده نانوکامپوزیتی به‌معنی افزایش مقاومت ماده در مقابل تغییر شکل پلاستیک می‌باشد که به معنی این است که نیرو به ذرات تقویت‌کننده منتقل

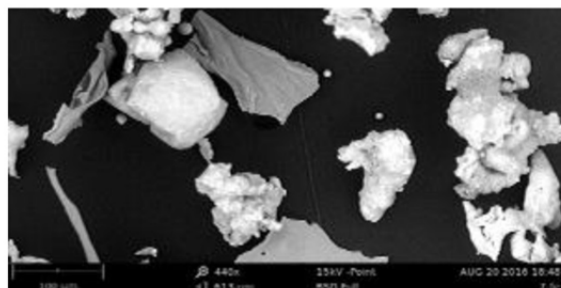


Fig. 1 SEM of stainless steel Powder

شکل 1 عکس SEM پودر فولاد زنگ‌نزن

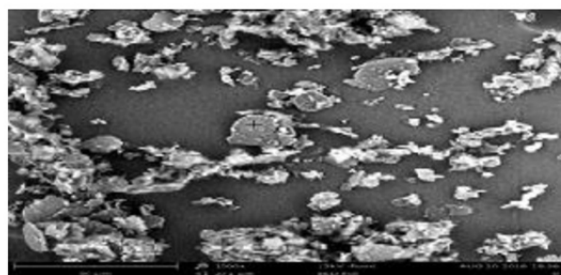


Fig. 2 SEM of hBN Powder

شکل 2 عکس SEM پودر هگزاگونال نیتريد بور

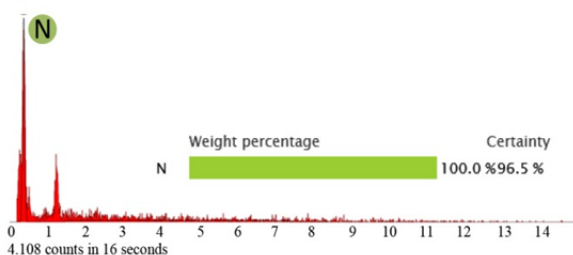


Fig. 3 EDX of hBN Powder

شکل 3 آنالیز EDX پودر هگزاگونال نیتريد بور

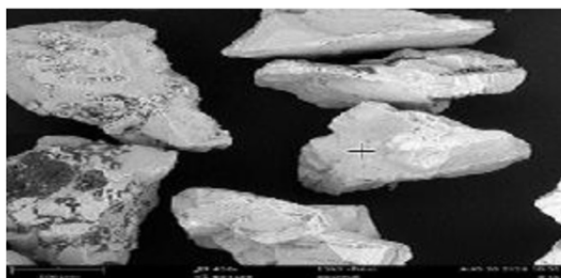


Fig. 4 SEM of TiC Powder

شکل 4 عکس SEM پودر کربید تیتانیوم

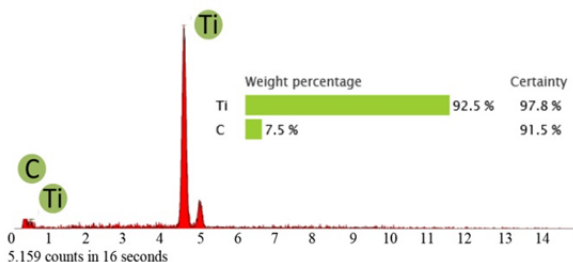


Fig. 5 EDX of TiC Powder

شکل 5 آنالیز EDX پودر کربیدتیتانیوم

برای آزمایش آنالیز اشعه ایکس ساخت شرکت فیلیپس مدل پی دیلیو 1730 می‌باشد و با ولتاژ 30 کیلوولت و جریان 25 میلی‌آمپر آزمایش انجام شده است. محدوده‌ی زاویه از 10 تا 80 درجه و جنس آند از جنس مس می‌باشد. برای حصول کیفیت بهتر الگوی پراش زمان اسکن 1 و سائز استپ 0.05 و همچنین شعاع گونومتر 173 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین حداقل بزرگنمایی برای شناسایی بیشتر پیک‌ها عدد 2 در نظر گرفته شده است. برای قالب‌سازی با توجه به فشرده‌سازی با دستگاه ایزواستاتیک سرد، استفاده از قالب‌های فلزی به روش معمول امکان‌پذیر نمی‌باشد. قالب‌ها به علت این‌که از همه طرف تحت فشار سیال قرار می‌گیرند، باید منقطع باشند. همچنین قالب‌ها باید، نسبتی بین حجم، طول، عرض و ارتفاع داشته باشند، در غیر این صورت، قالب و پودرهای آن‌ها تحت فشار، دچار اعوجاج خواهد شد و بیرون آوردن قطعه از قالب امکان‌پذیر نمی‌باشد. طرح و ابعاد قالب‌ها ابتدا توسط نرم‌افزار کتیا طراحی شد و سپس با کمک پرینتر سه‌بعدی چهارچوب و بدنه‌ی قالب ساخته شد. جنس بدنه‌ی قالب‌ها از جنس پلی‌لاکتیک اسید (PLA) می‌باشد. هنگامی که بدنه‌ی قالب تهیه شد، درون بدنه قالب، سیلیکون مایع با مشخصه‌ی RTV/2-4425 به همراه ماده سخت کننده برای استحکام بیشتر، ریخته شد و بعد از چند ساعت، سیلیکون به حالت جامد تبدیل می‌شود و آماده‌ی ریخته شدن پودر و قالب‌گیری در دستگاه فشار ایزواستاتیک سرد می‌باشد. برای فشردن پودرها از دستگاه فشار ایزواستاتیک سرد استفاده شده است. دستگاه فشار ایزواستاتیک سرد استفاده شده ساخت شرکت الکترو هیدروور تیکال پرس و از مدل klp 300E می‌باشد. مترکم‌سازی با کمک سیال روغن انجام پذیرفت. برای پخت و سینترینگ نمونه‌ها از کوره‌ی دما بالا تخت خلا متعلق به شرکت آلارگ استفاده شده است. آزمایش خمش سه نقطه برای تعیین استحکام خمشی از استاندارد مدل بوهلر ساخت کشور آمریکا و بار اعمالی بر نمونه‌ها برابر 500 گرم بوده است. آزمون‌ها و محاسبات مربوط به فاکتور تصحیح براساس استاندارد ASTM E92-82 انجام پذیرفته است. برای آزمون سایش از روش پین روی دیسک برای ارزیابی رفتار سایشی و تریبولوژیکی ماده استفاده شده است. دستگاه استفاده شده برای آزمون سایش متعلق به شرکت دلتا الکترونیک و مدل ASMT04L250AK ساخت کشور ژاپن می‌باشد. عملکرد دستگاه در بازه‌ی نیروی 5 الی 50 نیوتن می‌باشد. آزمون سایش با نیروی 30 نیوتن و سرعت دیسک 0.09 متر بر ثانیه و به فاصله 500 متر انجام پذیرفته است.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی میکروساختاری

به‌منظور بررسی پودرهای تهیه شده و محاسبه‌ی تقریبی سائز پودرها عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی از پودرها انجام پذیرفت. عکس مربوط به پودر اولیه فولاد زنگ‌نزن که به‌عنوان ماده پایه برای تولید نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است در "شکل 1" آمده است.

عکس‌برداری و طیف‌سنجی میکروسکوپ الکترونی از پودرهای اولیه‌ی تقویت کننده انجام پذیرفت که این نتایج در "شکل‌های 2 الی 5" آورده شده است که بیانگر سائز و درصد بالای خلوص پودرهای تهیه شده می‌باشد.

به‌علت این‌که پودرهای تقویت کننده در سائز میکرو تهیه شدند و برای ساخت ماده نانوکامپوزیت، مواد تقویت کننده باید به سائز نانو برسند به همین جهت پودرهای تقویت کننده با نسبت مساوی در آسیاب سیاره‌ای قرار گرفتند و مخلوط شدند و آسیاب کردن تا رسیدن به سائز نانو برای مواد

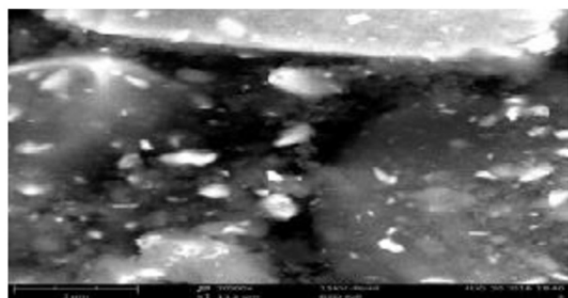


Fig. 10 SEM Of reinforcement particle after 25 h

شکل 10 عکس SEM پودرهای تقویت کننده بعد از 25 ساعت آسیاب

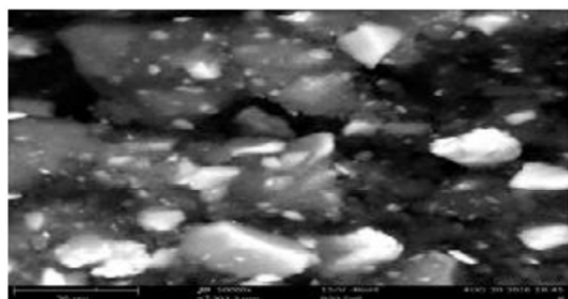


Fig. 11 SEM Of reinforcement particle after 30 h

شکل 11 عکس SEM پودرهای تقویت کننده بعد از 30 ساعت آسیاب

شدند و سپس عکس‌برداری الکترونی از پودرهای مخلوط شده انجام پذیرفت که این نتایج در "شکل‌های 12 و 13" آورده شده است. به منظور اطمینان مجدد از خلوص پودرهای مخلوط شده و نیز پراکندگی و سایز ذرات، آنالیز طیف سنجی بر روی آن‌ها انجام گرفت. این نتایج در "شکل‌های 14 و 15" آورده شده است. این نتایج نشان دهنده‌ی مخلوط خوب ذرات و ترکیب ایده آل مواد پس از 5 ساعت آسیاب می‌باشد.

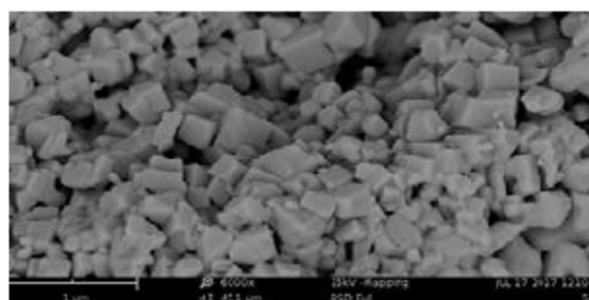


Fig. 12 SEM Of Mix particles with 2Wt%

شکل 12 عکس SEM پودرهای مخلوط شده با نسبت وزنی 2 درصد

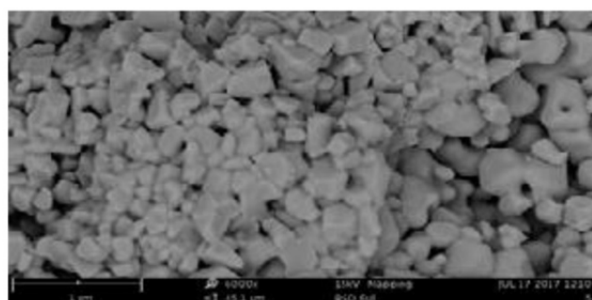


Fig. 13 SEM Of Mix particles with 10 Wt.%

شکل 13 عکس SEM پودرهای مخلوط شده با نسبت وزنی 10 درصد

تقویت‌کننده ادامه یافت. به همین منظور بعد از هر 5 ساعت آسیاب، از مخلوط پودرها عکس‌برداری الکترونی انجام گرفته است. بعد از 30 ساعت زمان آسیاب، پودرهای تقویت‌کننده به سایز نانو رسیدند. این عکس‌ها در "شکل‌های 6 الی 11" قابل مشاهده است و سایز متوسط ذرات پس از 30 ساعت آسیاب به سایز متوسط 40 نانومتر رسیدند که این مورد از مقدار بزرگ‌نمایی عکس مشخص است.

بعد از رسیدن پودرهای تقویت‌کننده به سایز نانو با رعایت درصد وزنی مدنظر، به همراه پودرهای فولاد زنگ‌نزن به مدت 5 ساعت در آسیاب مخلوط

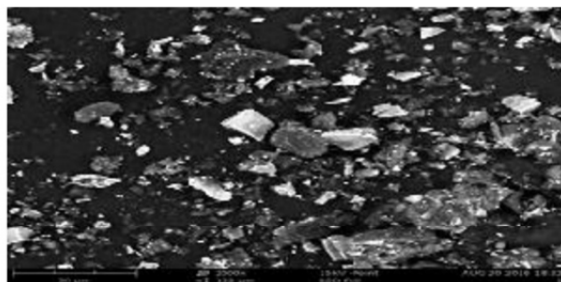


Fig. 6 SEM Of reinforcement particle after 5h

شکل 6 عکس SEM پودرهای تقویت کننده بعد از 5 ساعت آسیاب

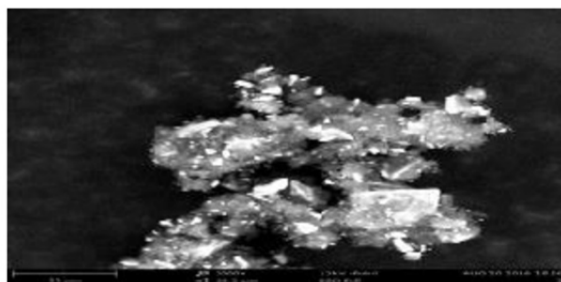


Fig. 7 SEM Of reinforcement particle after 10h

شکل 7 عکس SEM پودرهای تقویت کننده بعد از 10 ساعت آسیاب

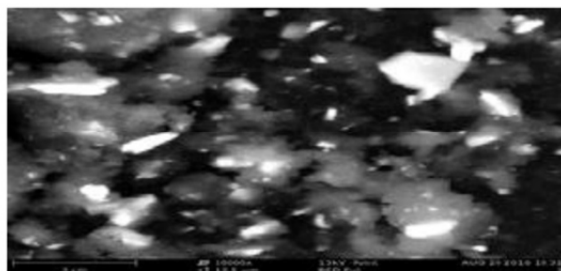


Fig. 8 SEM Of reinforcement particle after 15 h

شکل 8 عکس SEM پودرهای تقویت کننده بعد از 15 ساعت آسیاب

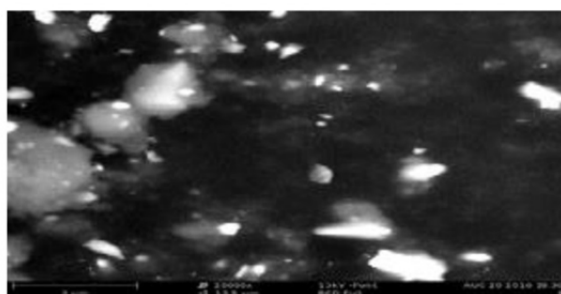


Fig. 9 SEM Of reinforcement particle after 20 h

شکل 9 عکس SEM پودرهای تقویت کننده بعد از 20 ساعت آسیاب

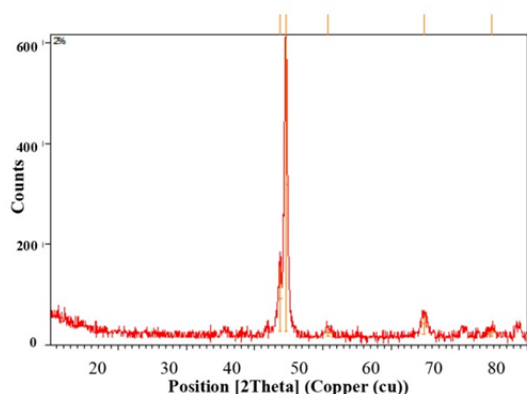


Fig. 16 XRD Of Mix particles with 2 Wt. %

شکل 16 عکس XRD پودرهای مخلوط شده با نسبت 2 درصد

جدول 1 پیک‌های شناسایی شده برحسب موقعیت و ارتفاع و پهنای پیک

Table 1 List of Picks according to Position, Height, width

موقعیت	ارتفاع پیک‌ها	پهنای پیک	عنصر شیمیایی
43.7	130.7	0.54	FeNi
44.6	583.05	0.36	TiC
50.7	17.3	1.44	Fe
64.8	41.2	0.92	Fe
74.6	14.2	0.78	hBN

جدول 2 ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه

Table 2 Chemical Composition in Sample

نام اجزا	فاصله	فرمول شیمیایی
آهن (فولاد زنگ‌نزن)	-0.050	Fe
آهن نیکل (تترائینات)	0.107	FeNi
کربیدتیتانیوم	-0.014	TiC
نیتريد بور	0.403	hBN

ماده نانوکامپوزیت با 10 درصد وزنی تقویت‌کننده نیز تحت آزمون آنالیز اشعه ایکس قرار گرفت که در "شکل 17" الگوی پراش آن و در جدول 3 لیست پیک‌های شناسایی شده به همراه شدت و پهنای پیکشان آورده شده است. عناصر شناسایی شده از نمونه نیز در جدول 4 آورده شده است که تمام عناصر ترکیبی شناسایی شده مانند نمونه‌ی با 2 درصد وزنی تقویت‌کننده می‌باشد.

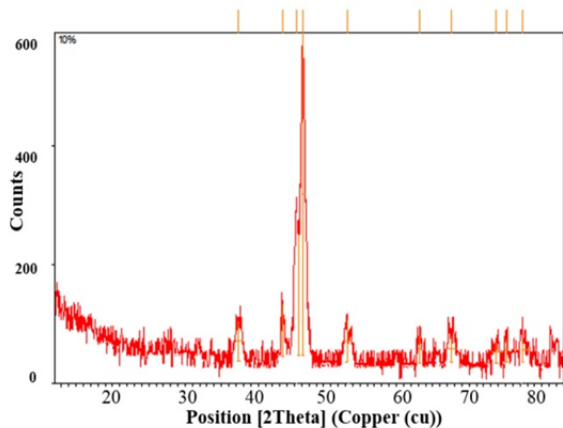


Fig. 17 XRD Of Mix particles with 10 Wt. %

شکل 17 عکس XRD پودرهای مخلوط شده با نسبت 10 درصد

Weight percentage	Certainty
Fe 57.1 %	93.0 %
Cr 10.4 %	79.6 %
Ni 10.2 %	80.0 %
Ti 8.7 %	84.1 %
N 8.4 %	85.5 %
C 5.1 %	80.8 %

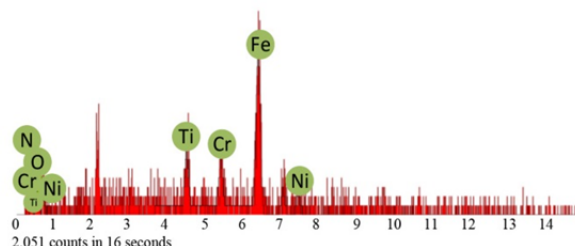


Fig. 14 EDX Of Mix particles with 2 Wt. %

شکل 14 عکس EDX پودرهای مخلوط شده با نسبت وزنی 2 درصد

Weight percentage	Certainty
Fe 42.1 %	92.0 %
Cr 32.4 %	93.0 %
Ni 15.1 %	86.1 %
Ti 6.1 %	84.3 %
N 4.3 %	81.7 %

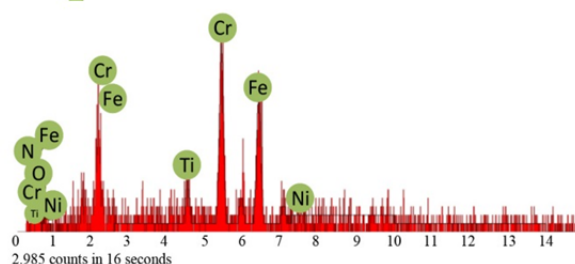


Fig. 15 SEM Of Mix particles with 10 Wt. %

شکل 15 عکس EDX پودرهای مخلوط شده با نسبت وزنی 10 درصد

عناصر کروم و نیکل نیز در عکس‌های فوق نیز یافت شده است که بیانگر حضور این ذرات در فولاد زنگ‌نزن اولیه‌ی تهیه شده که به عنوان عناصر آلیاژی به آهن اضافه می‌شود، می‌باشد. هرچند عناصر دیگری هم وجود دارد که در آنالیز وجود ندارد و علت آن مقادیر و درصد کم آن‌ها در ماده می‌باشد. ماده نانوکامپوزیت با 2 درصد وزنی تقویت‌کننده، تحت آزمون آنالیز اشعه ایکس قرار گرفت که در "شکل 16" الگوی پراش آن آورده شده است و در جدول 1 لیست پیک‌های شناسایی شده به همراه شدت و پهنای پیکشان آورده شده است. عناصر شناسایی شده از نمونه در جدول 2 آورده شده است که تمام ترکیبات ماده، شامل Fe، TiC، hBN، شناسایی شده است. ترکیب آهن شناسایی شده مربوط به پودر فولاد زنگ‌نزن به عنوان ماده پایه می‌باشد. همچنین ماده‌ی تترائیت (FeNi) تشکیل شده است که از ترکیب دو عنصر Fe و Ni حاصل شده است که این ترکیب در آسیاب هنگام مخلوط شدن و اتصال سرد بین ذرات حاصل شده است. این ماده به دلیل بزرگتر بودن شعاع اتمی آهن از شعاع اتمی نیکل و نفوذ اتم‌های آهن به داخل شبکه نیکل تشکیل شده است. این ترکیب در پژوهش‌های پیشین از جمله تحقیق شیرانی و همکارانش حاصل و گزارش شده است [25]. نتایج و شدت پیک‌های به دست آمده از آزمون بیانگر پراکندگی خوب و سایز مناسب مخلوط حاصله می‌باشد.

[36]. در مجموع در ماده‌ی نانوکامپوزیت تهیه شده در این مقاله با توجه به فشار، زمان و دمای پخت، با افزایش درصد تقویت کننده، سختی ماده نسبت به فولاد زنگ‌نزن بهبود یافته است.

3-3- بررسی خواص مکانیکی - سایش

برای آزمون سایش نیز نمونه‌هایی به ابعاد $40 \times 40 \times 10$ میلی‌متر تهیه شدند و تحت فشار، دما و زمان گفته شده پخته شدند و پس از آماده‌سازی سطح، تحت آزمایش سایش قرار گرفتند. نتایج پس از محاسبات و اعمال فاکتور تصحیح به صورت جدول 6 آمده است. ضریب اصطکاک نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن ساخته شده با روش متالورژی پودر از همخوانی قابل قبولی با سایر مراجع برخوردار است و بیانگر روش درست تهیه‌ی نمونه‌ها می‌باشد. با توجه به نیروی 30 نیوتن که بر قطعه برای انجام آزمون، اعمال شده است و با توجه به میانگین ضریب اصطکاک که برای هر نمونه به دست آمده است، نیروی اصطکاک اعمالی برحسب ضریب اصطکاک و نیرو حساب شده است که نیز در جدول 6 آورده شده است.

نمودار ضریب اصطکاک برحسب مسافت طی شده در بازه 0 تا 500 متر که آزمون براساس آن انجام گرفته، رسم شده است. این نمودارها را در شکل‌های 18 الی 20 آورده شده است.

مقاومت سایشی در کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها بستگی به ذرات

جدول 6 نتایج ضریب اصطکاک آزمون سایش

Table 6 Result of Sliding Testing

ردیف	درصد نانوذره (گرم)	میانگین ضریب اصطکاک	میانگین نیروی اصطکاک
1	0	0.814	24.42
2	2	0.794	23.82
3	10	0.681	20.43

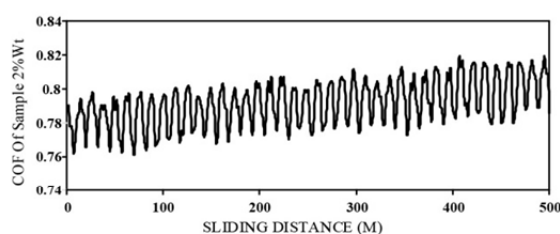


Fig. 18 COF chart of Powders 2%Wt.

شکل 18 نمودار ضریب اصطکاک پودرهای با 2 درصد وزنی

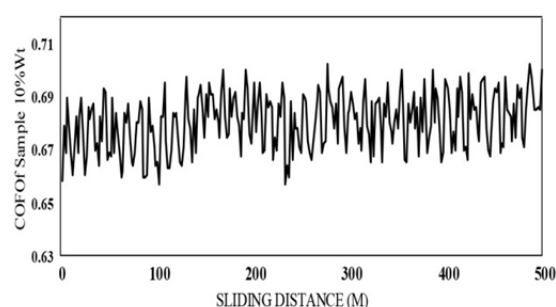


Fig. 19 COF chart of Powders 10%Wt.

شکل 19 نمودار ضریب اصطکاک پودرهای با 10 درصد وزنی

جدول 3 پیک‌های شناسایی شده برحسب موقعیت و ارتفاع و پهنای پیک

Table 3 List Of Picks according to Position, Height, width

موقعیت	ارتفاع پیک‌ها	پهنای پیک	عنصر شیمیایی
35.3	14.0	1.20	TiC
41.3	24.5	0.48	TiC
43.2	351.1	0.48	Fe, hBN
44.1	573.2	0.72	Fe, hBN
50.2	26.6	1.20	FeNi, hBN
60.2	24.0	0.72	TiC
64.5	12.2	1.44	Fe
70.7	17.7	1.68	hBN
72.1	20.3	0.48	TiC
77.2	37.3	0.48	FeNi, hBN

جدول 4 ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه

Table 4 Chemical Composition in Sample

نام اجزا	فاصله	فرمول شیمیایی
آهن (فولاد زنگ‌نزن)	0.076	Fe
کربیدتیتانیوم	-0.250	TiC
آهن نیکل	0.066	FeNi
نیتريد بور	0.292	hBN

3-2- بررسی خواص مکانیکی - میکروسختی

نمونه‌هایی به ابعاد تقریبی $30 \times 30 \times 30$ میلی‌متر تهیه شدند و پس از آماده‌سازی سطح، تحت آزمایش میکروسختی ویکرز قرار گرفتند. نتایج پس از محاسبات و اعمال فاکتور تصحیح به صورت جدول 5 آمده است. نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن و نانوکامپوزیتی به روش متالورژی پودر در فشار 400 مگاپاسکال فشرده شدند و به مدت 3 ساعت و دمای 1400 درجه سلسیوس در کوره پخته شدند.

نتایج حاصله از آزمون میکروسختی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار درصد نانوذره، افزایش سختی نسبت به فولاد زنگ‌نزن حاصل شده است. این افزایش سختی به واسطه‌ی حضور ذرات تقویت‌کننده TiC و hBN و همچنین بیانگر پراکندگی خوب و پیوند خوب بین فولاد زنگ‌نزن و ذرات تقویت‌کننده می‌باشد. در آزمون میکروسختی نیروی اعمالی از ماتریکس به ذرات تقویت‌کننده انتقال می‌یابد و این ذرات به واسطه‌ی حضورشان در ماتریکس سبب کرنش سختی ماده می‌شود. این استحکام ماده به واسطه‌ی استحکام ذرات تقویت‌کننده و سطح مشترک بین پیوندهای ذرات تقویت‌کننده و فولاد زنگ‌نزن می‌باشد. هرچه مقدار ماده تقویت‌کننده بیشتر باشد، مقاومت ماده در مقابل تغییرات پلاستیک بیشتر می‌باشد. نتایج از مطابقت قابل قبولی با توجه به سایر مراجع برخوردار است. در تمام پژوهش‌های پیشین که TiC به عنوان تقویت کننده برای فولاد زنگ‌نزن استفاده شده است، افزایش سختی حاصل شده است. در پژوهش ماهاتانا و همکارانش که hBN را با فولاد زنگ‌نزن ترکیب کرده‌اند، شاهد کاهش سختی ماده نانوکامپوزیت تهیه شده نسبت به فولاد زنگ‌نزن بوده‌اند ولی کاهش سختی تا دمای پخت 1150 درجه سلسیوس بوده‌است و سپس افزایش سختی در دماهای پخت بالای 1200 درجه سلسیوس، مشاهده شده است.

جدول 5 نتایج سختی حاصل از آزمون سختی

Table 5 Results of Micro Hardness Testing

ردیف	درصد نانوذره (گرم)	میکروسختی (ویکرز)
1	0	620
2	2	692
3	10	862

است و در "شکل 22 و 23"، با افزایش درصد تقویت‌کننده، شیارها کمتر، ریزتر و کم‌عمق‌تر شده‌اند و به این معنی است که مقاومت سایشی افزایش یافته است و ضریب اصطکاک مطابق نتایج به‌دست آمده، کمتر شده است.

4-3- بررسی خواص مکانیکی - استحکام خمشی

به منظور انجام آزمون استحکام خمش سه‌نقطه نمونه‌هایی به ابعاد تقریبی $11 \times 15 \times 44$ میلی‌متر تهیه شدند و پس از آماده‌سازی سطح، تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفتند. نتایج پس از محاسبات به صورت

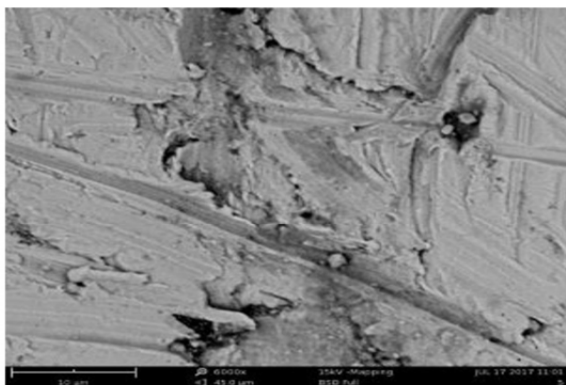


Fig. 21 SEM Of Surface Samples Of stainless steel

شکل 21 عکس SEM از سطح نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن

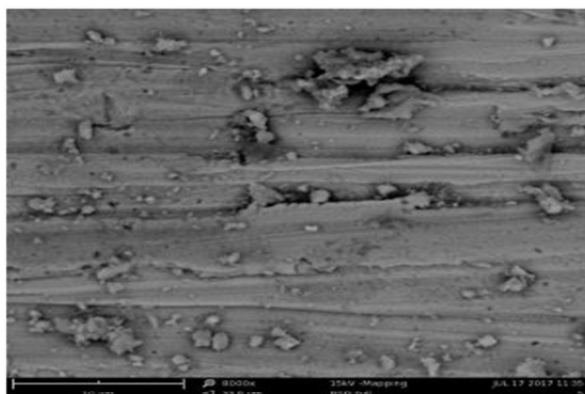


Fig. 22 SEM Of Surface Samples %2 Wt.

شکل 22 عکس SEM از سطح نمونه‌ی نانوکامپوزیتی 2% وزنی

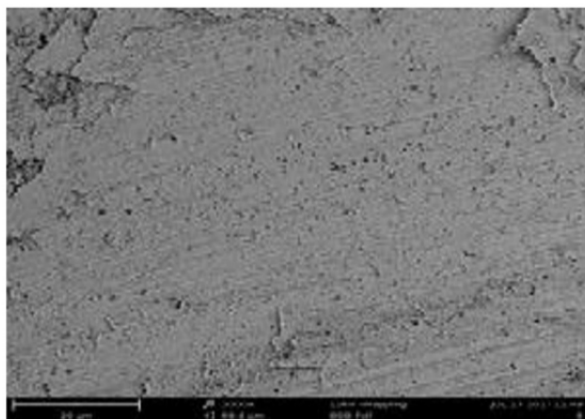


Fig. 23 SEM Of Surface Samples %10 Wt.

شکل 23 عکس SEM از سطح نمونه‌ی نانوکامپوزیتی 10% وزنی

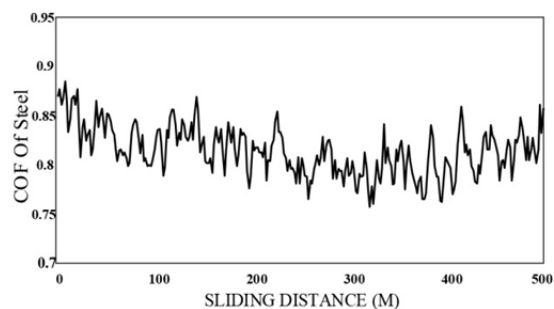


Fig. 20 COF chart of stainless steel Powders.

شکل 20 نمودار ضریب اصطکاک پودر فولاد زنگ‌نزن

تقویت‌کننده‌ی ماده دارد. در ماده‌ی مورد بررسی این رساله کاهش ضریب اصطکاک در تست سایش نسبت به فولاد زنگ‌نزن بدون تقویت‌کننده مشاهده شده است. افزایش مقاومت سایشی به واسطه‌ی اتصال خوب ذرات تقویت‌کننده به ماتریس می‌باشد و بیانگر اتصال قوی بین ذرات تقویت‌کننده و فولاد زنگ‌نزن می‌باشد. بهبود مقاومت سایشی به سائز، حجم و پراکندگی مناسب ذرات تقویت‌کننده در ماتریکس بستگی دارد. هرچه درصد ماده تقویت‌کننده بیشتر باشد، به معنی فاصله‌ی کمتر بین ذرات و ایزوتروپیک بودن ماده می‌باشد و سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. سایش تابع سختی و چقرمگی ماده می‌باشد و اگر سختی ماده بالا باشد، به معنی مقاومت بالایی ماده در مقابل تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. هرچه ماده‌ی تقویت‌کننده ریزتر باشد و به سائز نانو نزدیک‌تر باشد، سبب به تعویق افتادن و محدود کردن جریان پلاستیک ماتریکس حین ساییده شدن می‌شود. در ماده‌ی ساخته شده، این مقابله با جریان پلاستیک توسط ذره‌ی کربید تیتانیوم که با ماتریکس پیوند خوبی برقرار کرده است، حاصل شده و اجازه‌ی کنده شدن ذرات از ماده را نمی‌دهد و بار اصلی توسط این ماده تحمل می‌شود. ماده‌ی دیگر تقویت‌کننده، ماده‌ی روانکار هگزانگونا نیتريدبور می‌باشد و هدف ماده‌ی روانکار افزایش مقاومت سایشی می‌باشد و علت این پدیده به خاطر پیوند کوالانسی بین اتم‌ها در هر لایه و پیوند واندروالس ضعیف بین هر لایه می‌باشد و سبب راحت برش خوردن ماده وقتی نیرو موازی لایه‌ها اعمال شود، می‌شود و سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌گردد. ماده خودروانکار سبب جلوگیری از تماس فلز به فلز می‌شود. دو نوع عمده از سایش در صنعت، سایش خراشان و سایش چسبان می‌باشد. در سایش خراشان، ترک‌ها و شیارهای عمیق و بزرگ در سطح ماده ایجاد می‌شود و سبب تغییر شکل پلاستیک و شکست ترد می‌شود و اگر سایش خراشان کمتر شود، حجم برداشته شده از سطح ماده کمتر می‌شود. در مقابل در سایش چسبان، ترک‌ها و شیارهای نازک و کم عمق در سطح ایجاد می‌شود و سبب کاهش نرخ سایش در قطعه و ماده خواهد شد. با توجه به "شکل‌های 21 الی 23" که از سطح نمونه‌ها بعد از آزمون سایش تهیه شده است، بیانگر ایجاد ترک‌ها و شیارهای ریز و کم‌عمق در سطح ماده‌ی نانوکامپوزیتی می‌باشد. هرچه ماده تقویت‌کننده، ریزتر، بیشتر و دارای پراکندگی بهتر باشد، سطح ماده مقاومت بهتری در مقابل سایش از خود نشان می‌دهد. در شکل‌ها ترک‌ها و شیارها به وضوح مشخص است. با بررسی شکل‌ها و نتیجه‌ی آزمون سایش، ماده‌ی نانوکامپوزیت خاصیت کرنش سخت پیدا کرده است و در اثر این پدیده، سایش خراشان، به سایش چسبان تبدیل شده است. در "شکل 21" که مربوط به نمونه فولاد زنگ‌نزن است، شیارهای زیاد و عمیق قابل مشاهده

پودر جهت ساخت نمونه‌ها شامل فشرده‌شدن پودرها در فشار 400 مگاپاسکال، پخت نمونه‌ها در دما و زمان 1400 درجه سلسیوس و 4 ساعت در کوره انجام پذیرفت. نمونه‌ها مورد بررسی میکروساختاری قرار گرفتند و در ادامه خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن‌ها به شرح زیر آورده شده است.

- 1- آزمون میکروسختی برای هر سه نمونه انجام پذیرفت و با افزایش درصد تقویت‌کننده، میکروسختی هم افزایش یافت که علت آن انتقال نیرو به ذرات تقویت‌کننده و مقابله با تغییر شکل پلاستیک می‌باشد.
- 2- با انجام آزمون سایش، کاهش ضریب اصطکاک با افزایش مقدار ماده تقویت‌کننده حاصل شده است. عکس‌برداری SEM از سطح ساییده شده، نشان از تبدیل شدن سایش خراشان به سایش چسبان دارد که در آن کاهش تعداد و عمق شیارها و ترک‌ها در سطح ساییده شده‌ی نمونه‌ها با افزایش درصد تقویت‌کننده حاصل شده است.
- 3- آزمون خمش سه نقطه به‌منظور یافتن استحکام خمشی ماده، بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. استحکام خمشی نمونه‌ی حاوی 2 درصد تقویت‌کننده نسبت به نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن بدون تقویت‌کننده، افزایش یافته است که علت آن تغییر ساختار ماده به واسطه‌ی حضور ذرات تقویت‌کننده می‌باشد. با افزایش مقدار تقویت‌کننده با نسبت 10 درصد وزنی، استحکام خمشی کاهش یافته است و کمتر از دو نمونه‌ی دیگر شده است که علت آن افزایش درصد hBN ذرات تقویت‌کننده می‌باشد و به سبب ساختار لایه‌ای و پیوند ضعیف بین این لایه‌ها در این ماده می‌باشد.

5- مراجع

- [1] C. Poole, F. Owens, Jr, *Introduction to Nanotechnology*, vol. 3, pp. 321-328, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. Pub. Hoboken, 2003.
- [2] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P. V. Braun, *Nanocomposite Science and Technology*, pp. 1028-1044, New Jersey, John Wiley & Sons, 2006.
- [3] P. H. C. Camargo, K. G. Satyanarayana, F. Wypych, Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities, *Materials Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-39, 2009.
- [4] Q. Pham, Y. G. Jeong, S. C. Yoon, S. I. Hong, et al, Carbon nanotube reinforced metal matrix nanocomposites via equal channel angular pressing, *Proceeding of Transition Technology Publication*, Vol. 15, No. 1, pp. 245-248, 2010.
- [5] S. Goussous, W. Xu, X. Wu, K. Xia, Al-C nanocomposites consolidated by back pressure equal channel angular pressing, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11, pp. 1997-2001, 2009.
- [6] H. Yu, *Processing Routes for Aluminum Based Nano-Composites*, Thesis, worcester polytechnic institute, pp. 185-192, 2010.
- [7] R. Casati, M. Vedani, Metal matrix composites reinforced by nano-particles—a review, *Metals*, Vol. 4, No. 1, pp. 65-83, 2014.
- [8] A. SanatyZadeh, Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall-Petch effect, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 531, No. 1, pp. 112-118, 2012.
- [9] R. M. German, *Powder metallurgy science*, pp. 211-218, New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 1984.
- [10] C. DellaCorte, H. E. Sliney, Tribological properties of PM212: a high-temperature, self-lubricating, powder metallurgy composite, *National Aeronautics and Space Administration*, pp. 58-69, OH (USA). Lewis Research Center, 1989.
- [11] Z. Liu, Elevated temperature diffusion self-lubricating mechanisms of a novel cermet sinter with orderly micro-pores, *Wear*, Vol. 262, No. 5, pp. 600-606, 2007.
- [12] J. R. Davis, *Stainless Steels*: ASM international, 1994.
- [13] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, High-strength and highly-uniform composite produced by anodizing and accumulative roll bonding processes, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 10, pp. 4816-4822, 2010.
- [14] C. Suryanarayana, N. Al-Aqeeli, Mechanically alloyed nanocomposites, *Progress in Materials Science*, Vol. 58, No. 4, pp. 383-502, 2013.
- [15] D. Gay, *Composite Materials: Design and Applications*, pp. 88-144, CRC press, 2014.
- [16] X. Dangsheng, Lubrication behavior of Ni-Cr-based alloys containing MoS₂ at high temperature, *Wear*, Vol. 251, No. 1, pp. 1094-1099, 2001.

جدول 7 آمده است. نمونه‌ها به روش متالورژی پودر در فشار 400 مگاپاسکال فشرده و به مدت 3 ساعت و دمای 1400 درجه سلسیوس در کوره پخته شدند و تحت آزمون خمشی سه نقطه قرار گرفتند. استحکام خمشی، مطابق رابطه (1) با استفاده از تئوری خطی تیرهای مستطیلی به دست می‌آید.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2wt^2} \quad (1)$$

که در آن F نیروی اعمالی در لحظه شکست برحسب نیوتن، L فاصله بین دو تکیه‌گاه پایینی که برای نمونه‌ها همگی 35 میلی‌متر لحاظ شده است، w عرض نمونه، t ضخامت نمونه می‌باشد. علت تغییر ضخامت نمونه‌ها، به علت قالب سیلیکونی می‌باشد که کمی انعطاف‌پذیر می‌باشد و نمی‌توان ابعاد یکسانی از نمونه استخراج کرد و برای افزایش دقت محاسبات به صورت جداگانه برای هر نمونه اندازه‌گیری انجام پذیرفته است.

نتایج آزمون خمش نیز مانند سایر نتایج آزمون‌های سایش و میکروسختی، برای نمونه‌ها متفاوت است. این تفاوت‌ها به‌واسطه‌ی حضور ذرات تقویت‌کننده و مقدار و پیوند بین ذرات تقویت‌کننده و ماتریکس می‌باشد. ذرات تقویت‌کننده کربیدتیتانیوم به واسطه‌ی دارا بودن سفتی بالای این ماده و همچنین انتقال نیرو به این ذرات و نیروی زیاد جهت شکستن این ذرات، سبب افزایش استحکام خمشی می‌شود و در مقابل ذرات هگزگونال نیتريدبور، به‌دلیل ماهیتشان و ساختار لایه‌ای و پیوند ضعیف بین لایه‌ها، عموماً سبب کاهش استحکام در ماده می‌شود. در ماده‌ی نانوکامپوزیت تهیه شده در این رساله که از هر دو ماده به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است، در نمونه‌ی تقویت شده با 2 درصد وزنی، افزایش استحکام خمشی نسبت به نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن بدون تقویت‌کننده مشاهده شده است که به واسطه‌ی پیوند خوب بین ماتریکس و ذرات تقویت‌کننده می‌باشد و سبب انتقال تنش داخلی به ذرات تقویت‌کننده می‌شود و به واسطه‌ی حضور این ذرات، شکست به تعویق بیفتد و استحکام بیشتر شود. در نمونه‌ی 2 درصد وزنی که شامل 1 درصد TiC و 1 درصد hBN می‌باشد، مقدار کم نیتريدبور سبب کاهش استحکام نگردیده است ولی در نمونه‌ی 10 درصد وزنی که شامل 5 درصد وزنی TiC و 5 درصد وزنی hBN می‌باشد، سبب کاهش استحکام خمشی شده است که به واسطه‌ی افزایش مقدار hBN و ساختار لایه‌ای و ضعیف آن می‌باشد. این رشد کاهشی به قدری است که حتی استحکام خمشی نمونه‌ی 10 درصد حتی از فولاد زنگ‌نزن بدون تقویت‌کننده هم کمتر به‌دست آمده است.

4- نتایج

در این مقاله ماده‌ی نانوکامپوزیت جدیدی با زمینه فولاد زنگ‌نزن 316L با ذرات تقویت‌کننده TiC و hBN تهیه شدند. پودرهای تقویت‌کننده در سائز میکرو تهیه شدند و با نسبت مساوی در آسیاب ریخته شدند و پس از 30 ساعت آسیاب، این پودرها به سائز نانو رسیدند. سپس پودر فولاد زنگ‌نزن با نسبت 0، 2 و 10 درصد وزنی تقویت‌کننده در آسیاب مخلوط شدند و نمونه‌هایی با روش متالورژی پودر تهیه شدند. پارامترهای روش متالورژی

جدول 7 نتایج استحکام خمشی حاصل از آزمون خمش

Table 7 Results of Bending Testing

ردیف	درصد نانوذره (گرم)	نیروی حداکثر (کیلو نیوتن)	ضخامت (میلی‌متر)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)
1	0	25.714	10	900
2	2	32.842	11	949.975
3	10	32.11	12	780.451

- [27] J. Li, F. Li, K. Hu, Y. Zhou, TiB 2/TiC nanocomposite powder fabricated via high energy ball milling, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, No. 16, pp. 2829-2833, 2001.
- [28] W. Chen, Y. Gao, C. Chen, J. Xing, Tribological characteristics of Si 3 N 4-hBN ceramic materials sliding against stainless steel without lubrication, *Wear*, Vol. 269, No. 3, pp. 241-248, 2010.
- [29] L. Gao, X. Jin, J. Li, Y. Li, J. Sun, BN/Si 3 N 4 nanocomposite with high strength and good machinability, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 415, No. 1, pp. 145-148, 2006.
- [30] D. Wei, Q. Meng, D. Jia, Mechanical and tribological properties of hot-pressed h-BN/Si 3 N 4 ceramic composites, *Ceramics international*, Vol. 32, No. 5, pp. 549-554, 2006.
- [31] D. R. Petrak, J. D. Lee, Silicon nitride/boron nitride composite with enhanced fracture toughness, *Google Patents*, Vol. 8, pp. 201-218, 1994.
- [32] R. Sachan, J.-W. Park, Formation of nanodispersoids in Fe-Cr-Al/30% TiB 2 composite system during mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 485, No. 1, pp. 724-729, 2009.
- [33] I. J. Shon, S. L. Du, I. Y. Ko, T. W. Kim, et al, Mechanical synthesis and rapid consolidation of a nanocrystalline 5.33 Fe 0.37 Cr 0.16 Al 0.4 Si 0.07-Al 2 O 3 composite by high-frequency induction heating, *Ceramics International*, Vol. 37, No. 4, pp. 1353-1357, 2011.
- [34] I. Manivannan, S. Ranganathan, S. Gopalakannan, S. Suresh, et al, Tribological and surface behavior of Silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposite, *Surfaces and Interfaces*, 2017.
- [35] K. Ramkumar, S. Sivasankaran, A. S. Alaboodi, Effect of alumina content on microstructures, mechanical, wear and machining behavior of Cu-10Zn nanocomposite prepared by mechanical alloying and hot-pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 709, pp. 129-141, 2017.
- [36] S. Mahathanabodee, T. Palathai, S. Raadnu, R. Tongsi, et al, Effects of hexagonal boron nitride and sintering temperature on mechanical and tribological properties of SS316L/h-BN composites, *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 588-597, 2013.
- [17] G. Hammes, R. Schroeder, C. Binder, A. N. Klein, et al, Effect of double pressing/double sintering on the sliding wear of self-lubricating sintered composites, *Tribology International*, Vol. 70, pp. 119-127, 2014.
- [18] W. Du Frane, O. Cervantes, G. Ellsworth, J. Kuntz, Consolidation of cubic and hexagonal boron nitride composites, *Diamond and Related Materials*, Vol. 62, pp. 30-41, 2016.
- [19] R. Haubner, M. Wilhelm, R. Weissenbacher, B. Lux, Boron nitrides—properties, synthesis and applications, in: *High Performance, Non-Oxide Ceramics II*, Vol. 8, pp. 1-45, 2002.
- [20] Y.-L. Li, R.-X. Li, J.-X. Zhang, Enhanced mechanical properties of machinable Si 3 N 4/BN composites by spark plasma sintering, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 483, pp. 207-210, 2008.
- [21] C. C. Onuoha, C. Jin, Z. N. Farhat, G. J. Kipouros, K. P. Plucknett, The effects of TiC grain size and steel binder content on the reciprocating wear behaviour of TiC-316L stainless steel cermets, *Wear*, Vol. 350, pp. 116-129, 2016.
- [22] N. Oh, S. Lee, K. Hwang, H. Hong, Characterization of microstructure and tensile fracture behavior in a novel infiltrated TiC-steel composite, *Scripta Materialia*, Vol. 112, pp. 123-127, 2016.
- [23] S. Hu, Y. Zhao, Z. Wang, Y. Li, Q. Jiang, Fabrication of in situ TiC locally reinforced manganese steel matrix composite via combustion synthesis during casting, *Materials & Design*, Vol. 44, pp. 340-345, 2013.
- [24] W. Chen, J. Zhou, Preparation and characterization of stainless steel/TiC nanocomposite particles by ball-milling method, *Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition*, Vol. 24, No. 1, pp. 38-41, 2009.
- [25] M. H. Shirani, A. Saeedi, M. Kasiri, A. Shirani, The effect of mechanical activation on sintering and mechanical properties Fe-50Ni-TiC, *New processes in materials engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 57-62, 2012. (in فارسی)
- [26] A. Genç, S. Coşkun, M. Öveçoğlu, Microstructural characterizations of Ni activated sintered W-2wt% TiC composites produced via mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 497, No. 1, pp. 80-89, 2010.